



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

DEMONSTRATEUR MAGNETIQUE



Rapport final

Elaboré par

Osmann Sari, Peter W. Egolf, Nathanaël Alber, Nicolas Erbeau
Communauté de recherche HEIG-VD et AIT/CeTT / Institut de Génie Thermique,
groupe TiS

Route de Cheseaux 1 – 1401 Yverdon-les-Bains,

osmann.sari@heig-vd.ch,

<http://igt.heig-vd.ch/web/>



Impressum

Datum: 27 novembre 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie,

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, bereichsleiter@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101608

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Objectif	2
3.	Démonstrateur I « TherMag-01 »	3
4.	Démonstrateur II 	4
5.	Technique de mesure.....	9
6.	Mesure de l'effet magnétocalorique du gadolinium	9
7.	Essais sans écoulement d'air.....	10
8.	Essais avec ventilation	12
9.	Conclusions	12
10.	Suite des travaux.....	12

Résumé

La réfrigération magnétique est une technologie qui repose sur l'effet magnéto calorique. Le principe de refroidissement magnétique repose sur les propriétés magnéto caloriques (*magneto caloric effect*) de certains matériaux à des températures proches de leur température de Curie. Ces matériaux ont la propriété de s'élever en température lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, et se refroidissent de ce même ΔT lors que ce champ est éliminé.

Afin d'explorer cette technologie et de développer des compétences, l'Institut de Génie Thermique (IGT) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) a conçu et développé un premier démonstrateur technologique.

Le matériau utilisé est du gadolinium pur à 99.9%. Il est sous forme de granulés cylindriques d'environ 3 mm de longueur et de 2 mm de diamètre.

La roue au Gadolinium est mise en rotation au moyen d'un moteur électrique fonctionnant entre 25 à 50 tours/min (commande variable) dans un champ magnétique de 1 Tesla d'induction magnétique. L'écoulement de l'air est maintenu dans l'échangeur rotatif au moyen d'un ventilateur dont la vitesse est également variable.

Le démonstrateur est réalisé et est fonctionnel.

1. Introduction

Les dangers de l'impact des fluides frigorigènes synthétiques sur l'environnement ainsi que les importantes mesures de sécurité, poussent l'industrie du froid à rechercher et à s'engager sur de nouvelles voies permettant de supprimer certains gaz ou d'en diminuer les quantités dans les installations à tout le moins. Depuis une dizaine d'années, la réduction de la charge de réfrigérant dans les installations frigorifiques est une priorité.

Aujourd'hui les exigences se sont accrues et la tendance consiste en l'élimination de la charge de réfrigérant dans les installations frigorifiques.

Le refroidissement par effet magnéto calorique (MCE) est une solution possible. La réfrigération magnétique est une technologie qui repose sur l'effet magnéto calorique, de manière analogue à la compressibilité du réfrigérant pour la réfrigération à gaz.

Afin d'explorer cette technologie et de développer des compétences l'Institut de Génie Thermique (IGT) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) a conçu et développé un premier démonstrateur technologique « TherMag-01 ». Ce démonstrateur a certes a révélé certaines faiblesses dans :

- le circuit magnétique,
- la roue en matériau magnéto calorique, initialement prévue en nid d'abeille,
- la conception mécanique.

2. Objectif

L'objectif de cette étude qui vise l'optimisation du démonstrateur technologique « TherMag-01 » déjà existant de l'IGT (Institut de Génie Thermique de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud) consiste à réaliser un disque rotatif, tournant dans un champ magnétique important, contenant du gadolinium sous forme de granulés et finalement mesurer l'effet magnétocalorique¹ du gadolinium à une température ambiante donnée.

L'idée de base est de pouvoir réaliser un système possédant plusieurs possibilités de configurations de fonctionnement tout en garantissant le résultat :

- Système à un étage,
- Système à régénération à 2 étages,
- Système à deux cascades.

¹ Le froid magnétique repose sur la propriété de certains lanthanides, tel le gadolinium, à élever leur température lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique. Cette propriété est dénommée effet magnétocalorique (magneto caloric effect :MCE).

3. Démonstrateur I « TherMag-01 »

Le démonstrateur « TherMag-01 » est montré dans la Figure 1.

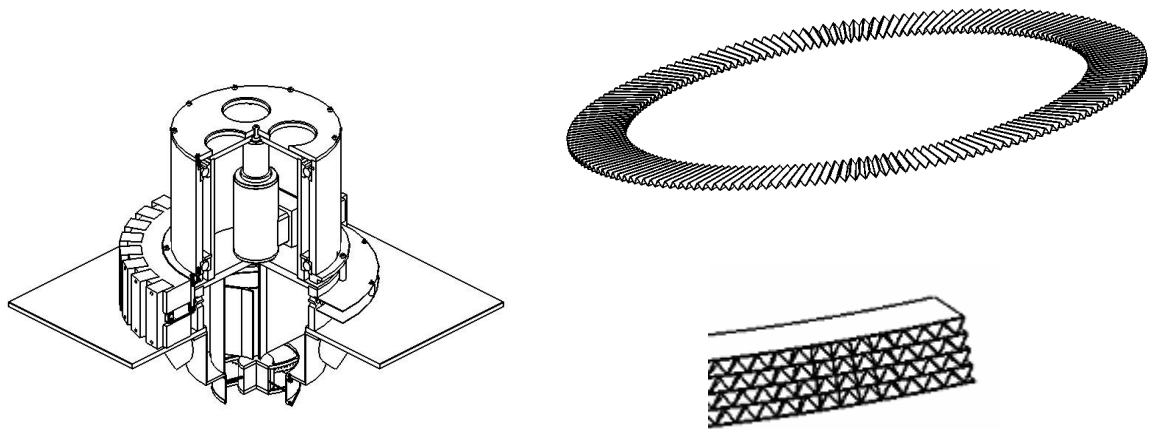


Figure 1 : Vue « TherMag-01 »

Dans sa conception originale le démonstrateur « TherMag-01 » est équipé :

- d'un circuit magnétique – sur la demi-circonférence – et est composé de 36 aimants permanents. L'espace de l'entre fer est de 24 mm.
- D'une roue rotative en nid d'abeille, prise en sandwich entre deux disques. Cette roue traverse le champ magnétique sur 18°.

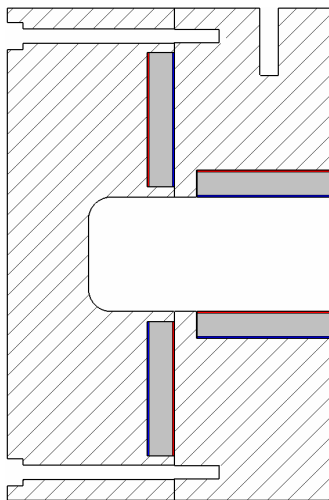


Figure 2 : Vue en coupe de l'ancien circuit magnétique « TherMag-01 ».

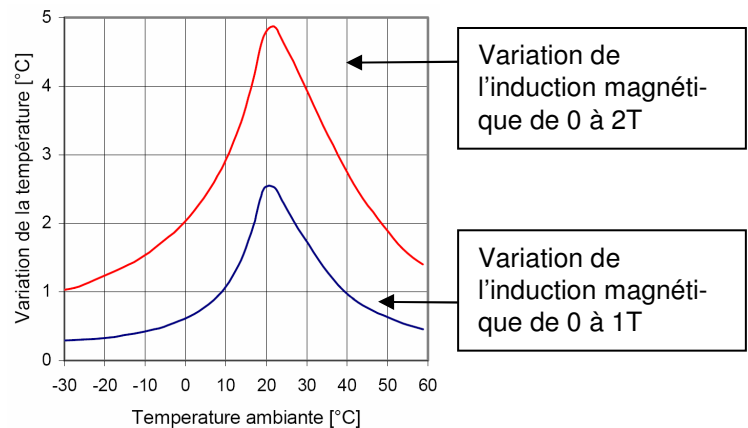


Figure 3 : Variation de la température du gadolinium lors de l'application d'un champ magnétique pour différentes températures ambiantes.

L'induction magnétique au centre de l'entrefer (24 mm) de l'ancien circuit magnétique du prototype était d'environ 0.2 Tesla. Le circuit était composé de quatre aimants permanents en néodyme-fer-bore (NdFeB) de grade N45² répartis régulièrement sur une demi-couronne (voir Figure 2 pour le positionnement des aimants).

Avec une induction magnétique si faible, il est difficile de mettre en évidence l'effet magnétocalorique du gadolinium (voir Figure 3 pour la différence de température du gadolinium en fonction de l'induction magnétique).

² Grade N45 : Br = 1.33T, Hc = 863 kA/m

Il était donc nécessaire de développer un circuit magnétique qui possède une plus grande induction dans son entrefer.

4. Démonstrateur II



Le concept global de « TherMag-01 » est préservé. D'importantes optimisations ont été étudiées et adaptées au premier démonstrateur technologique.

4.1 Optimisation du circuit magnétique

Pour améliorer cette induction, des aimants permanents NdFeB de grade N52³ ont été choisis et plusieurs géométries de circuit magnétique ont été étudiées.

La géométrie qui a été retenue (*Figure 4*) présente l'avantage de bien s'accorder avec le reste du prototype déjà existant et multiplie par quatre l'induction magnétique dans l'entrefer⁴.

Par ailleurs, le circuit magnétique de l'ancien prototype était assemblé en demi-couronne. Le disque, sous l'effet des forces magnétiques ne s'équilibrait pas et avait tendance à se « coller » aux aimants. En effet, de part l'assemblage du circuit, les forces magnétiques s'exerçaient de manière asymétrique sur le disque. Pour remédier à ce problème, le circuit magnétique a été assemblé en deux quarts de couronne se faisant face (*Figure 8*).

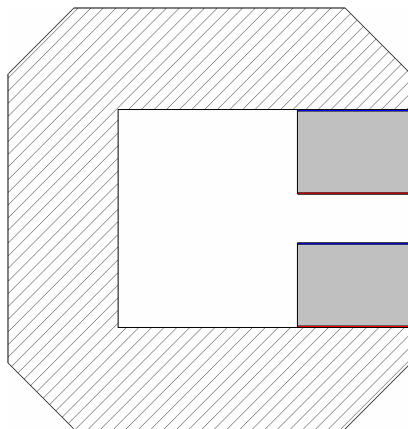


Figure 4 : Vue en coupe du circuit magnétique qui a été retenu.

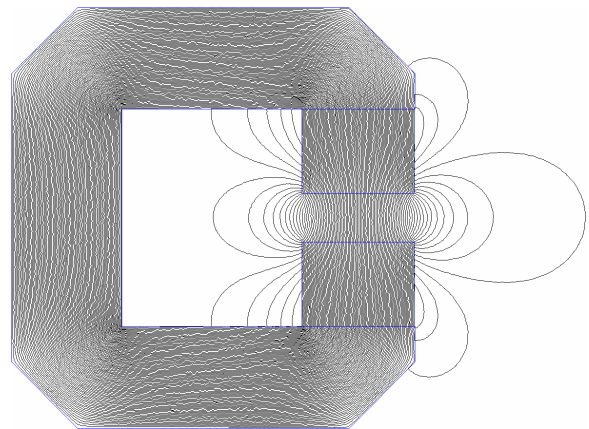


Figure 5 : Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique dans le circuit.

³ Grade N52 : $B_r = 1.43\text{T}$, $H_c = 1030\text{ kA/m}$

⁴ L'induction au milieu de l'entrefer a été mesurée à 0.8 T contre 0.2 T avec l'ancien circuit magnétique.

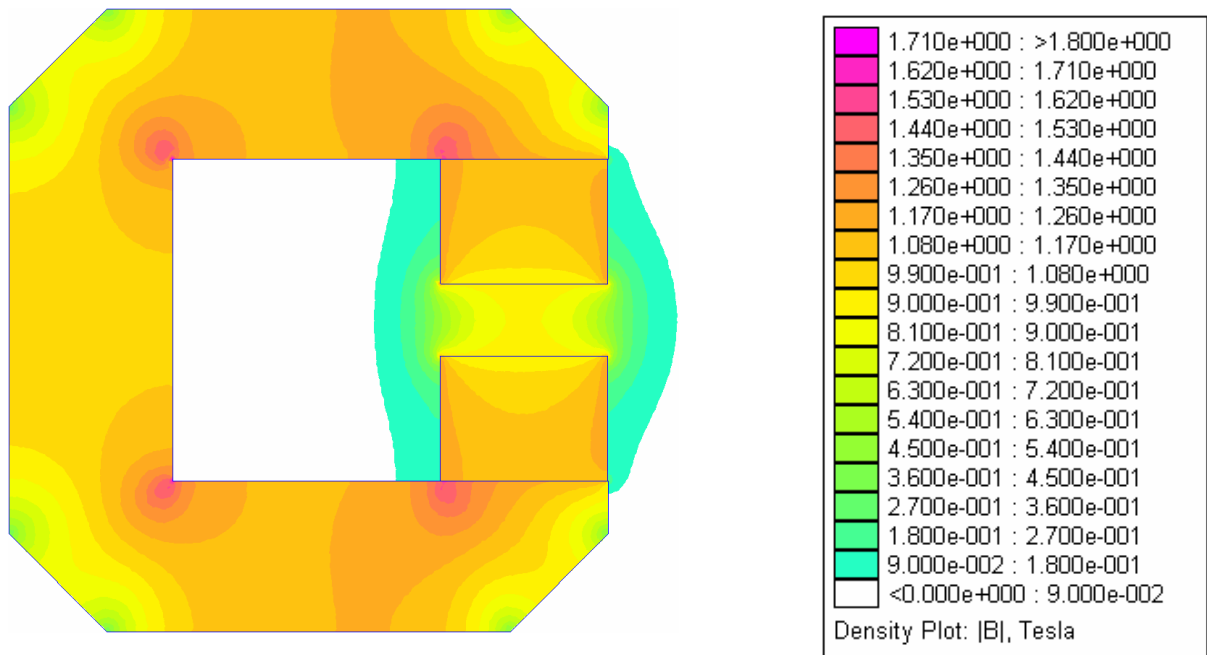


Figure 6 : Simulation numérique de l'induction magnétique dans le circuit

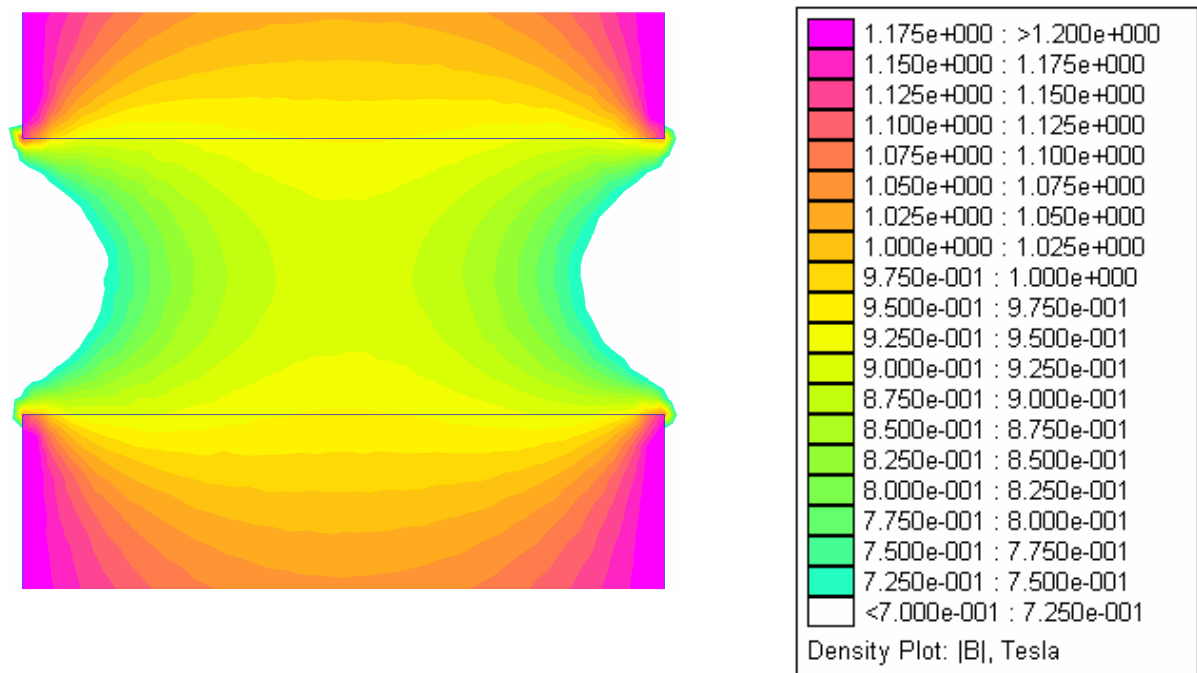


Figure 7 : Simulation numérique de l'induction magnétique dans l'entrefer.

4.2 Roue échangeur rotatif au gadolinium

Le gadolinium pur à 99.9% est utilisé sous forme de granulés cylindriques d'environ 3 mm de longueur et de 2 mm de diamètre.

Le gadolinium pur est relativement stable dans l'air sec. Par contre, il forme rapidement un oxyde dans de l'air humide.

Le gadolinium a donc été enfermé dans des paniers grillagés. Ces derniers étant garnis

d'un filtre très fin, les granulés de gadolinium sont ainsi confinés à l'intérieur des paniers.



Figure 8 : *Panier de granulés de Gadolinium*

La géométrie du disque a été imposée par le premier démonstrateur existant.

Seule la hauteur du disque a été modifiée en passant de 24 mm à 17.2 mm. Ceci afin d'augmenter l'induction magnétique dans le gadolinium.

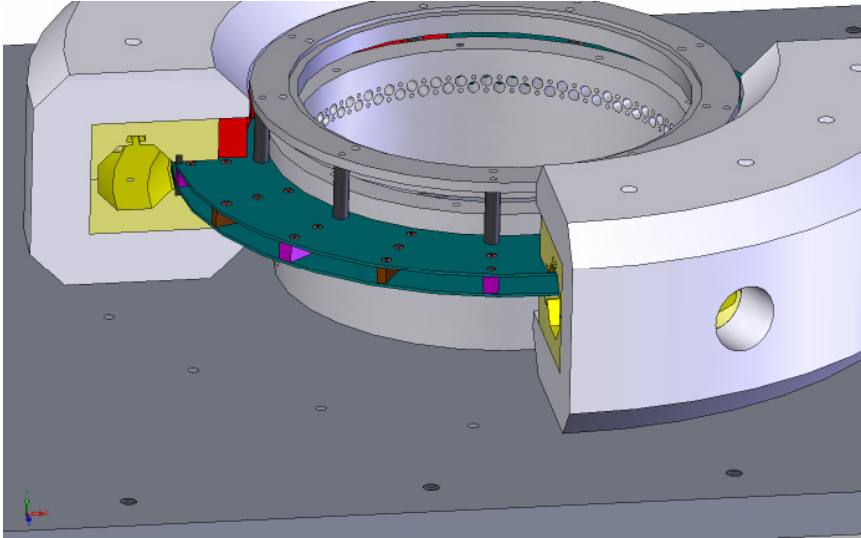


Figure 8 : Vue des deux circuits magnétiques et du disque rotatif contenant le gadolinium. Les aimants permanents sont représentés en couleur en rouge. Le disque rotatif lui est en couleur verte.

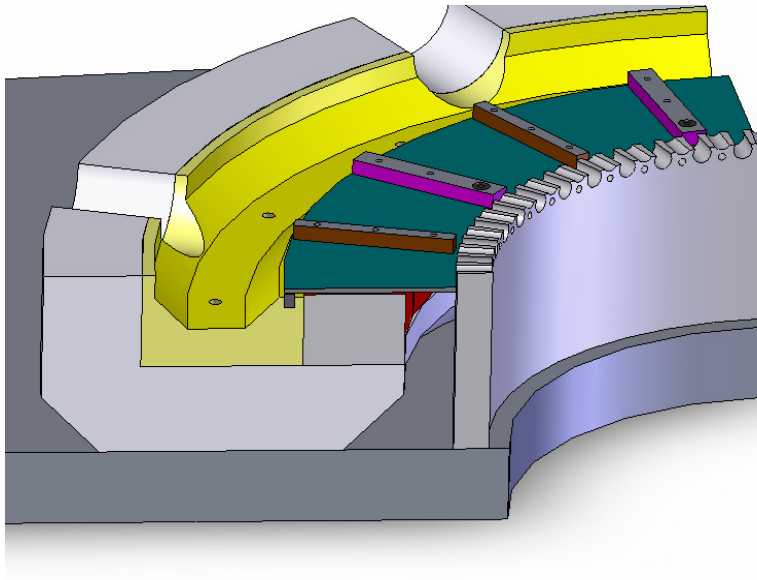


Figure 9 : Vue en coupe d'un circuit magnétique avec le bas du disque rotatif. Les paniers contenant le gadolinium sont placés entre les entretoises (couleurs roses et brunes). La circulation de l'air passe par les perçages de la pièce centrale, traverse les paniers de gadolinium pour ensuite être canalisée par la couronne (en jaune) et finalement être évacuée par les deux grands perçages radiaux.

4.3 Réalisation du Démonstrateur II

Selon le branchement des conduits d'air toutes ces configurations de l'écoulement de l'air peuvent être ainsi obtenues.

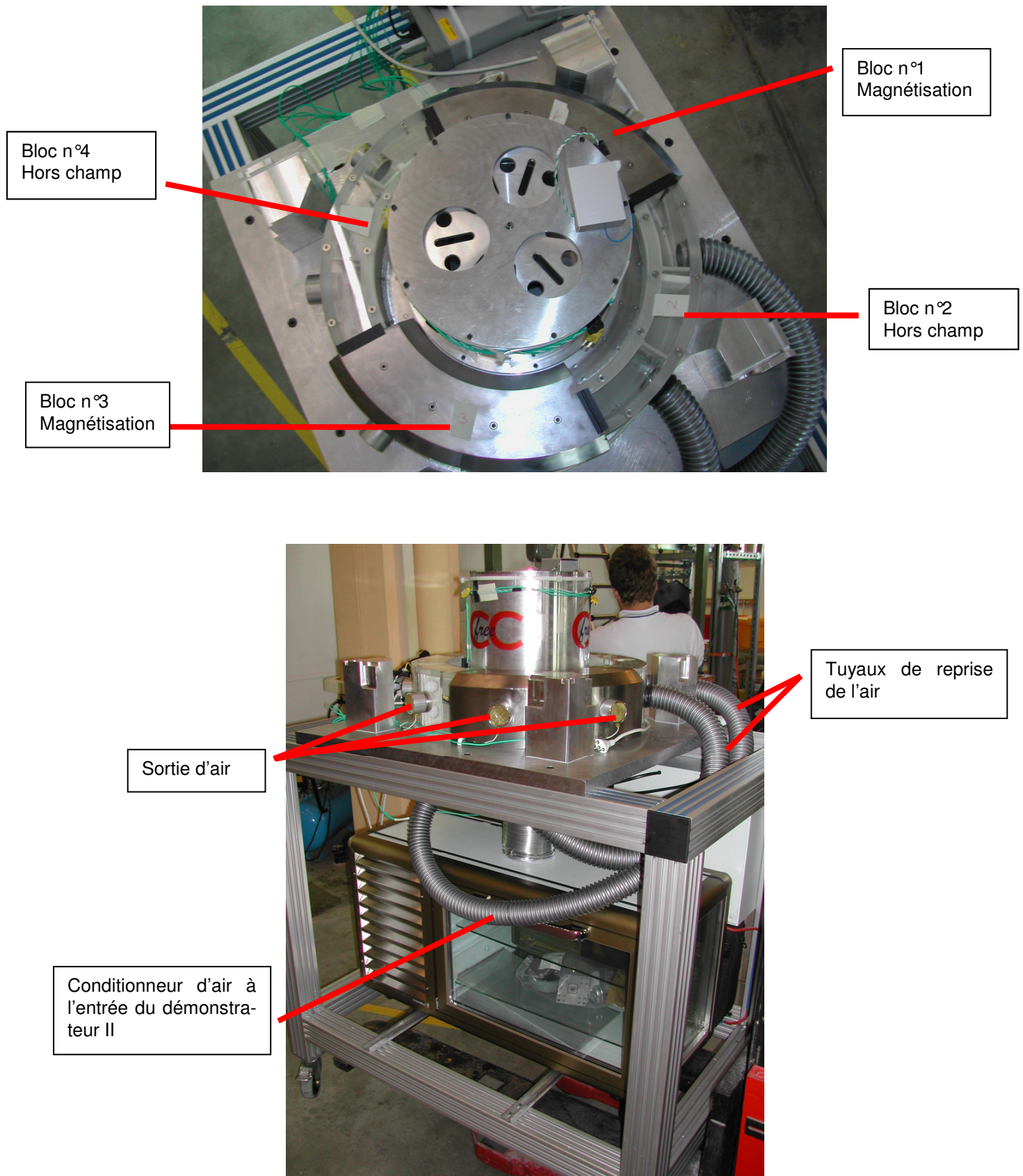


Figure 10 : Photo du démonstrateur CfC

Les blocs 1 et 3 correspondent à la magnétisation de l'échangeur rotatif, les blocs 2 et 4 correspondent à la démagnétisation de la roue.

Afin de maintenir des conditions de température et d'humidité à l'entrée du démonstrateur CfC correspondant à la température de Curie du Gd, et ce indépendamment de la température ambiante, un conditionneur d'air est placé à l'entrée.

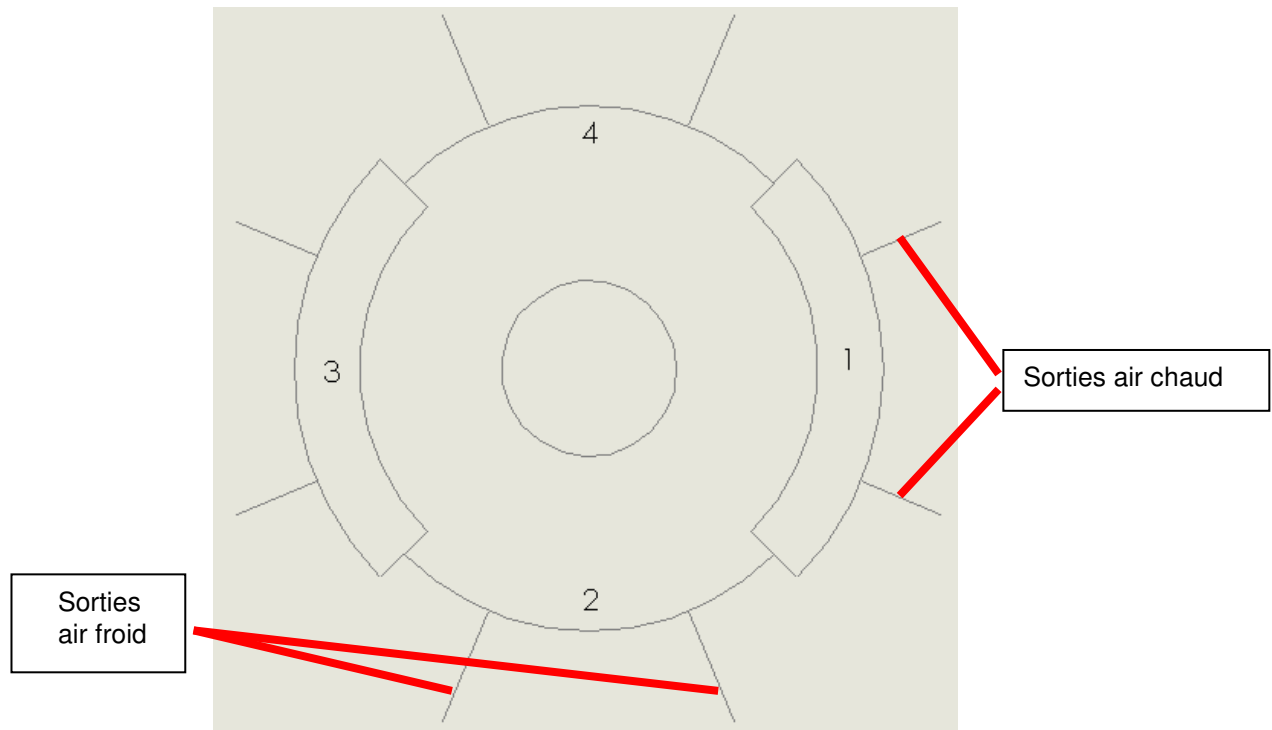


Figure 11: Schéma d'installation

La roue au Gadolinium est mise en rotation au moyen d'un moteur électrique fonctionnant entre 25 à 50 tours/min (commande variable).

L'écoulement de l'air est maintenu dans l'échangeur rotatif au moyen d'un ventilateur dont la vitesse est également variable.

5. Technique de mesure

Pour mesurer la température dans le gadolinium, un thermocouple de type K de 2 mm de diamètre a été introduit dans un des paniers.

Afin de déterminer le moment où le champ magnétique est appliqué au gadolinium, un autre panier opposé à 180° a été équipé d'une sonde à effet Hall « Gaussmètre ».

6. Mesure de l'effet magnétocalorique du gadolinium

La Figure 12 montre un exemple de la distribution de la température du Gadolinium et du champ magnétique.

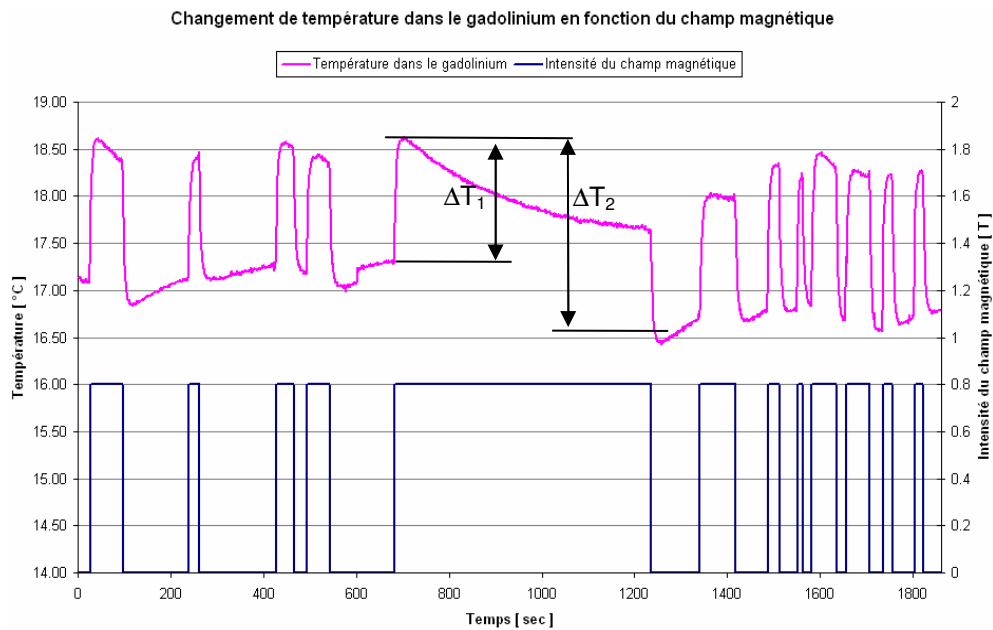


Figure 12 : En accord avec la tendance des courbes de la Figure 3 la température dans le gadolinium varie d'environ 1.5°C sous une induction magnétique de 0.8T à une température ambiante de l'ordre de 17°C.

7. Essais sans écoulement d'air

Une première série de mesure est effectuée sans écoulement selon la démarche suivante :

- Mise et maintien en température du système CfC,
- Rotation de la roue de la position 4 à 1 (magnétisation),
- Maintien de la roue dans l'aimant durant 150 s,
- Rotation de la roue de la position 1 à 2 (démagnétisation),
- Stabilisation du système.

Durant cette série de mesures, nous avons pu observer que le plus grand effet magnéto calorique se situe dans une plage de températures variant entre 18 et 22°C.

Dans cette plage de températures, nous avons constaté que le gadolinium a une moyenne de ΔT_1 qui vaut 1.6 K et de ΔT_2 qui vaut 2.2 K.

La faible valeur du ΔT_2 provient du fait que les mesures sont faites sans circulation d'air au travers des paniers de gadolinium.

La réponse du Gadolinium au champ magnétique est de l'ordre de 12 secondes pour atteindre sa valeur maximale. Les valeurs concernant les temps de montée de température sont approximatives car la sonde n'est pas encore en parfait contact avec le gadolinium.

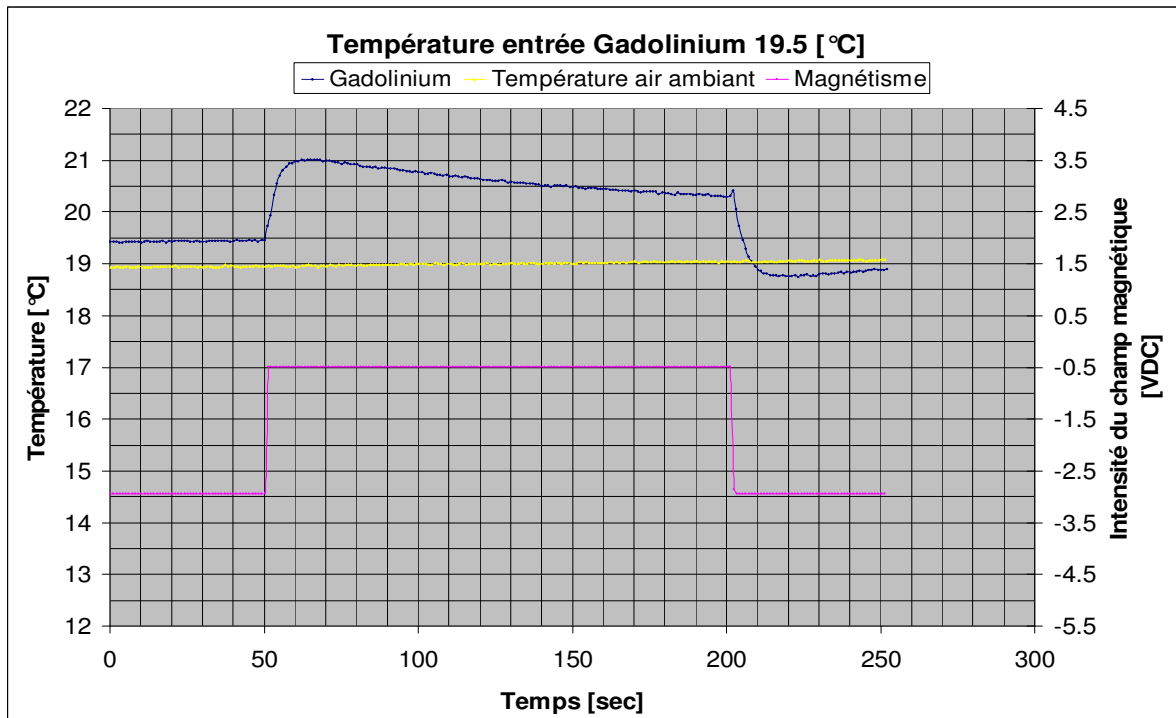


Figure 13 : Distribution de la température dans un panier de Gd de la roue active en présence de l'aimant

Toujours sans écoulement d'air, un cycle complet de fonctionnement du CfC est visualisé dans la Figure 14.

Durant nos manipulations, nous avons pu constater que la vitesse de descente en température du gadolinium varie lorsqu'il n'a pas un temps de repos assez long entre deux magnétisations/démagnétisations.

En effet lors de la première manipulation, la température du gadolinium ΔT_2 a d'abord fait un saut de 2.1 K puis de 1.6 K.

Le gadolinium subit une induction rémanente. Il faut donc en tenir compte pour évaluer la vitesse de rotation optimale du l'échangeur rotatif.

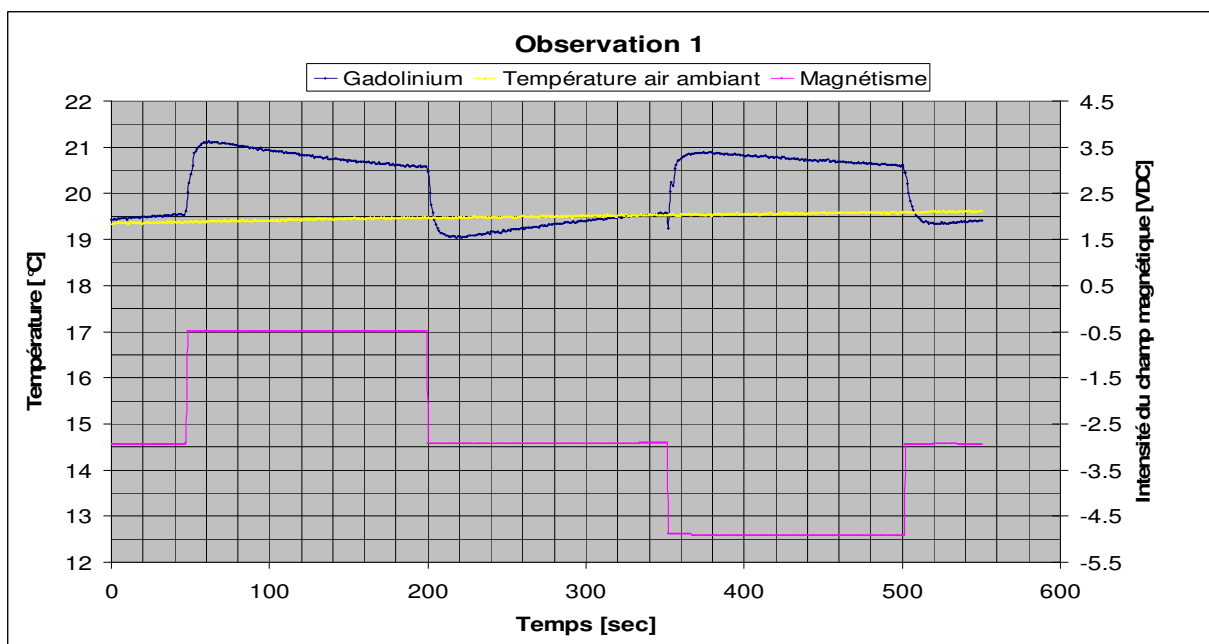


Figure 14 : Distribution de la température dans un panier de Gd de la roue active en présence de l'aimant sur un cycle complet

8. Essais avec ventilation

Dans la Figure 15, nous pouvons voir la température de sortie d'air chaud (sortie bloc n°1) et celle de la sortie d'air froid (sortie bloc n°2). Ces courbes de températures effectuent deux variations distinctes qui correspondent aux rotations du disque de gadolinium. Si nous avions continué à effectuer des rotations aller retour du disque, la différence de température entre la sortie chaude et la sortie froide se serait stabilisée à un écart constant correspondant au deuxième saut.

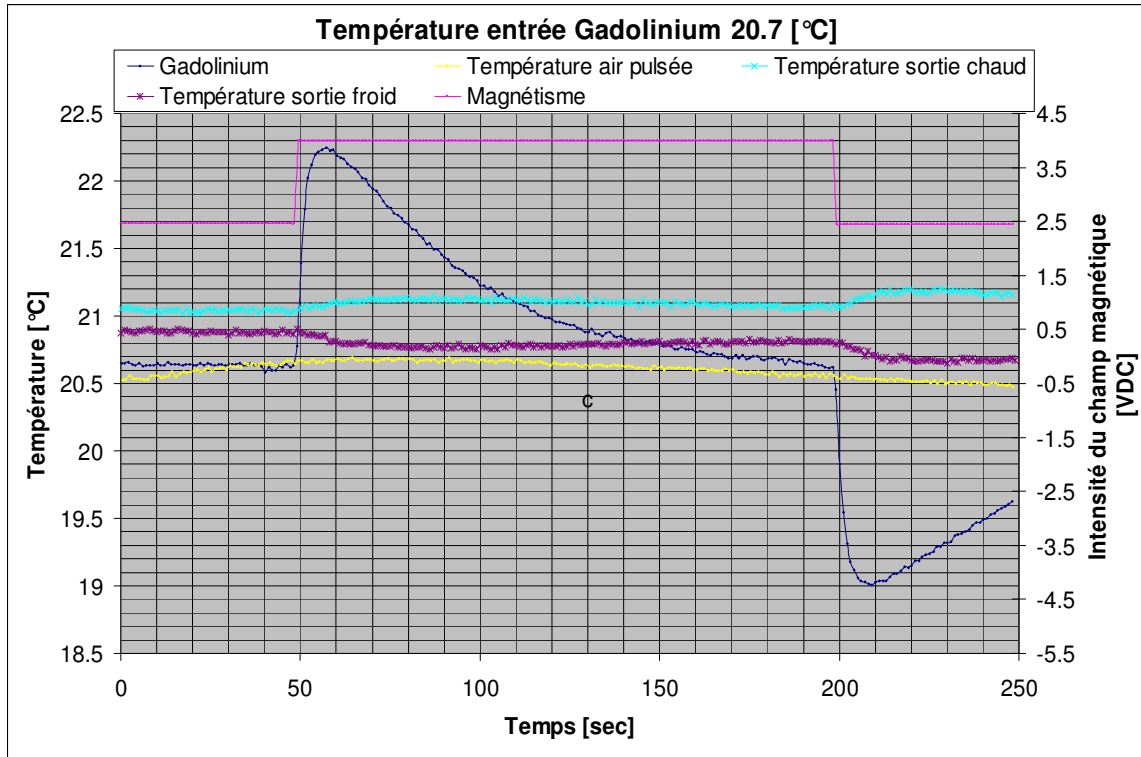


Figure 15 : Distribution de la température dans un panier de Gd de la roue active en présence de l'aimant avec ventilation

9. Conclusions

Le démonstrateur est réalisé et est fonctionnel.

Les améliorations apportées au prototype (augmentation de l'induction magnétique et système de panier dans le disque rotatif), permettront de mesurer l'effet magnétocalorique de différents alliages à des températures ambiantes différentes. Ceci sera très utile pour le choix des alliages magnétocaloriques qui seront introduits dans le futur démonstrateur.

10. Suite des travaux

- Augmenter l'induction du champ magnétique à 2 Tesla tout en maintenant une construction légère et à faible coût financier,
- Tester de nouveaux matériaux et alliages à « géant » effet magnéto calorique,
- Développer un concept de pompe à chaleur à effet magnétocalorique.